

DESCONTAMINACIÓN DE SOLOS

*Isabel Vidal Tato**
Universidade de Santiago
de Compostela

A. INTRODUCCIÓN

A urbanización e as actividades industriais presentan un alto potencial de contaminación do solo e da auga subterránea mediante fugas, derrames e o depósito de residuos e axentes químicos, como poden ser os produtos petrolíferos, disolventes clorados, pesticidas e outros.

Esta contaminación supón unha seria ameaza para o medio e a saúde humana e os custos para eliminala poden resultar moi elevados, polo que existe unha importante necesidade de avaliar a natureza e extensión da contaminación e as súas implicacións, así como de desenvolver e implantar tecnoloxías de descontaminación eficaces e económicas.

No VI Programa de Acción da Comunidade Europea en materia do

Medio insístese na importancia de reducir o deterioro do ambiente causado polo mal uso, o esgotamento e a contaminación dos recursos naturais como o solo, a auga ou o aire. Os obxectivos fixados con respecto ó medio e á saúde consisten en “obter unha calidade de medio tal que os niveis de contaminantes antropoxénicos, incluídos os diversos tipos de radiación, non representen riscos significativos para a saúde das persoas”¹.

En canto ó uso sostible e o mantemento da calidade dos recursos híbridos, a Comunidade adoptou recentemente unha nova directiva marco da auga que estende a protección da capa freática a todas as augas e fixa un obxectivo xuridicamente vinculante de “bo estado destas augas”². Entre as accións do VI Programa encóntrase a de garantir a plena aplicación desta directiva. É de esperar,

* Profesora Titular de Enxeñería Química.

1 Comisión das Comunidades Europeas, Comunicación da Comisión ó Consello, ó Parlamento Europeo, ó Comité Económico e Social e ó Comité das Rexións sobre o Sexto Programa de Acción da Comunidade Europea en materia do Medio, Bruxelas, 24.1.2001COM (2001) 31 final 2001/0029 (COD).

2 Directiva 2000/./ CE do Parlamento Europeo e do Consello pola que se establece un marco comunitario de actuación no ámbito da política de augas.

polo tanto, que no período de vixencia do Programa (2001-2010) se potencien as accións dirixidas a paliar os problemas derivados da contaminación de augas subterráneas, como son os programas comunitarios de investigación que “poden axudar a desenvolver as tecnoloxías avanzadas, as mellores prácticas de xestión e as metodoloxías e instrumentos necesarios para apoiar a lexislación sobre a auga”.

Por outra banda, as tecnoloxías de descontaminación de acuíferos, que noutros países xa están consolidadas e foron aplicadas con éxito, son en España practicamente descoñecidas, e os estudos sobre a posibilidade da súa aplicación aínda escasean.

O presente traballo é o primeiro dunha liña de investigación na que se seguirá profundando e cubrindo moitos dos aspectos que se atopan nunha fase moi deficiente de estudo. Os principais obxectivos son os seguintes:

—Proporcionar unha visión xeral da problemática da contaminación de solos e augas subterráneas.

—Descrición xeral dalgunhas das principais tecnoloxías dispoñibles para o tratamento de augas subterráneas e solos naturais contaminados.

O enfoque convencional para a descontaminación de auga subterránea foi a extracción, tratamento en superficie e reinxección ou descarga da

auga tratada, método que se coñece como *Pump and Treat* (P&T)³. Comezou a ser utilizado a principios ou mediados da década de 1980 e aínda constitúe unha das tecnoloxías máis amplamente utilizadas. No caso dos solos falaríamos de lavado (*Soil washing*).

As tecnoloxías *in situ*, nas que a auga contaminada non se bombea á superficie, consisten en evitar o manexo de auga contaminada en superficie, o almacenamento ou eliminación de auga parcialmente tratada e a necesidade de escavar solos. Dentro destas diferéncianse os métodos que tratan o terreo situado sobre o nivel freático (*Soil cleanup technologies*) e aqueles que tratan os contaminantes baixo o dito nivel freático (*Ground water cleanup technologies*). En calquera caso, existen tecnoloxías de remediación *in situ* que tratan a auga e o solo conxuntamente, como é o caso da extracción de dobre fase (*Dual-phase Extraction, DPE*).

Os contaminantes presentes nas augas subterráneas son frecuentemente compostos orgánicos volátiles, coñecidos como VOC (*Volatile Organic Compounds*) e, dentro deste grupo, a contaminación atópase asociada comunmente ó derrame de produtos petrolíferos procedentes de vertidos accidentais ou fugas en tanques subterráneos de almacenamento en gasoliñeiras e outras instalacións.

³ Anque non é do gusto da autora, mantéñense as denominacións orixinais das tecnoloxías en lingua inglesa por seren desenvolvidas principalmente nos Estados Unidos. Aínda coñecendo a falta de corrección desta nomenclatura o seu uso é indispensable na profesión do enxeñeiro.

B. CONCEPTOS BÁSICOS

Descríbense a seguir unha serie de conceptos básicos para o estudo da contaminación subterránea e as tecnoloxías destinadas ó seu tratamento.

O solo e as rochas constitúen o medio poroso polo que circula a auga subterránea baixo a acción de diversas forzas; está formado por un agregado de partículas minerais que deixan entre elas ocos, poros ou intersticios que poden estar cheos de auga, gases, partículas orgánicas ou minerais de menor tamaño. A porosidade defínese como o cociente entre o volume de ocos e o volume de sólidos existentes nun volume dado de medio poroso. Se a porosidade depende do tamaño e distribución dos grans da rocha coñécese como porosidade primaria, mentres que a porosidade secundaria é a producida por fenómenos tales como a disolución do cemento ou matriz, disolución a grande escala de poros e fisuras en rochas solubles, ou controladas estruturalmente pola fracturación, como é o caso máis frecuente de rochas como os granitos, gneises, etc.

A porosidade xoga un importante papel na aptitude dun medio para a transmisión da auga, aptitude que se expresa pola conductividade hidráulica (K) (tamén denominada coeficiente de permeabilidade) e que constitúe o principal parámetro que caracteriza as propiedades hídricas dos materiais xeolóxicos. A relación entre a porosidade e a conductividade hidráulica

non é simple, xa que existen moitos factores concorrentes.

O medio subterráneo adoita presentar dúas zonas claras en canto ó estado de saturación na auga de poros e fisuras:

—Zona de vao ou non saturada: zona máis superficial, na que a auga só enche parcialmente poros e fisuras e se despraza pola acción da gravidade.

—Zona saturada: zona máis profunda, na que todos os poros están cheos de auga. Se deixa transmitir a auga con certa facilidade denomínase acuífero.

A zona non saturada presenta á súa vez tres subdivisións en función do estado no que se encontra a auga. Na zona solo-auga, que se estende desde a superficie do terreo e a profundidade máxima ata a que penetran as raíces das plantas (uns decímetros), o contido de humidade varía en función das fluctuacións de temperatura e da presión do vapor, causadas polas variacións de temperatura do aire e do solo. Por baixo, cunha espesura variable, esténdese a zona de vao intermedia, que termina onde comeza a zona capilar, na que a auga satura os poros e ascende pola capilaridade desde o nivel freático. O nivel freático é unha superficie teórica que delimita as zonas saturada e non saturada do solo, e que se determina de maneira aproximada polo nivel da superficie da auga no interior dos poros que penetran baixo a zona saturada. Esta limita en profundidade cunha zona

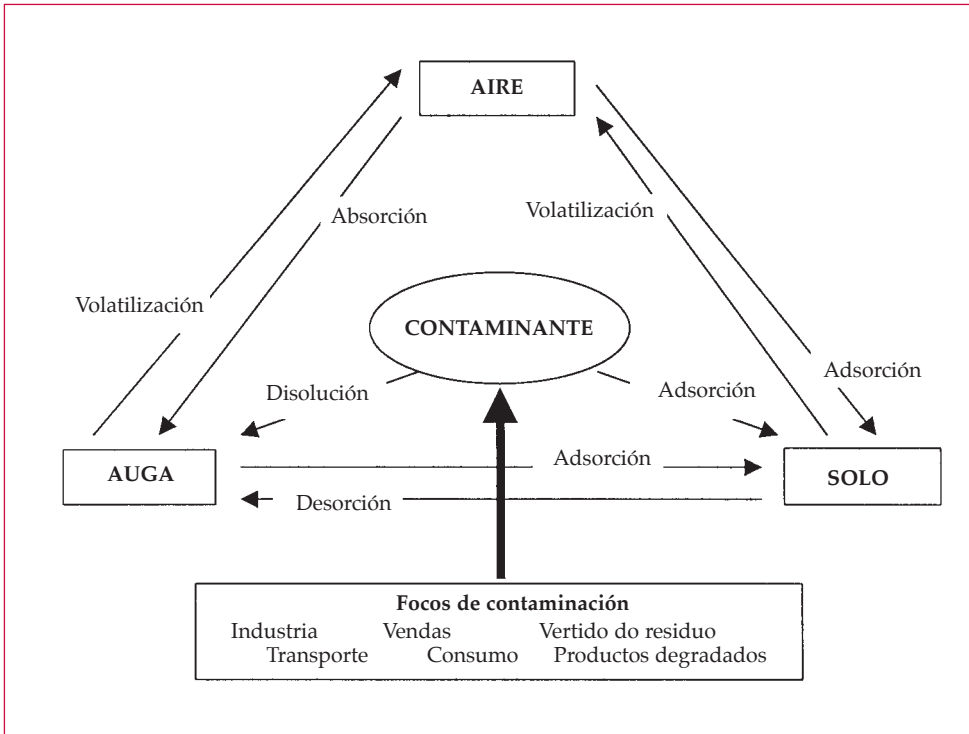


Figura 1. Movemento de contaminantes no medio.

onde a compactación do terreo fai que a auga non poida emigrar.

Os acuíferos clasifícanse, de forma xeral, en acuíferos non confinados, nos que a parte superior da zona saturada se atopa a presión atmosférica, e acuíferos confinados, nos que unha capa xeolóxica pouco permeable impide o fluxo cara a arriba e a presión na parte superior do acuífero excede a presión atmosférica.

Os contaminantes que penetran na zona non saturada moveranse lentamente. Unha vez que a contaminación

subterránea acada o acuífero, esténdese por el en forma de penacho ou pluma de contaminación, na dirección do fluxo da auga. A natureza da migración dos contaminantes e, polo tanto, a forma e velocidade da pluma, dependen de varios fenómenos que favorecen o transporte (advección, dispersión, gradientes de viscosidade ou densidade...) e doutros que contribúen a retardalo (adsorción, precipitación e transformación). As características dos contaminantes que determinan en qué medida influirá cada un dos procesos son, entre outras, a súa densidade,

solubilidad, capacidade de adsorción, biodegradación e presión de vapor.

C. CONTAMINANTES E SOLUBILIDADE EN AUGA

Pódese establecer a seguinte clasificación dos contaminantes en función do seu grao de miscibilidade na auga:

CONTAMINANTES PARCIALMENTE MISCIBLES NA AUGA

Distinguiranse neste apartado dous casos en función da densidade dos contaminantes respecto á da auga:

1. *Contaminantes máis densos cá auga.* Trátase de contaminantes que tenden a fluír verticalmente en sentido descendente cara ó fondo do acuífero, ata se estancar sobre a unidade confinada inmediatamente inferior á zona saturada. Unha vez no fondo, o movemento da pluma contaminante está condicionado en gran medida pola topografía da unidade confinada baixo o acuífero, de tal modo que a dirección do fluxo dos contaminantes non coincide necesariamente coa da auga subterránea.

Debido ós fenómenos de dispersión e solubilización, os contaminantes que constitúen os bordes da pluma densa contribuirán ó sistema de fluxo local da auga subterránea. Deste xeito formaranse dúas áreas de contaminación: a pluma principal de fluído denso e unha área adxacente de auga subterránea contaminada, como resultado da dispersión e solubilización



Desde sempre a Humanidade aproveitou as augas subterráneas. Na imaxe, escaleiras de acceso a un pozo na organización urbana de Hazor, tamén coñecida como Fortaleza de Salomón.

das porcións de fluído situadas na zona perimétrica da pluma densa.

É necesario establecer os límites da área contaminada, tanto da pluma como da auga subterránea. Para localizar totalmente a pluma é necesario

un coñecemento detallado da situación da superficie superior da primeira zona confinada (ou capa con menor conductividade hidráulica), para o que se fai necesaria a instalación de pozos de monitorización con intervalos apantallados que abrangan toda a espesura do acuífero. En canto á porción de fluído que permanece disolta na auga subterránea, esta pasará a formar parte do sistema de fluxo da auga, pero nun período de tempo máis longo que no caso de se tratar de fluídos moi miscibles, xa que o fenómeno de solubilización será máis lento que neses casos.

2. *Contaminantes menos densos cá auga.* No caso dos contaminantes cunha densidade menor cá da auga e parcialmente miscibles nela, a maior zona de contaminación ten lugar na parte superior da zona saturada e a migración da pluma está controlada pola forma do nivel freático. Como resultado da dispersión e solubilización, os contaminantes contribuirán ó fluxo de auga subterránea e a pluma disiparase gradualmente ata unha distancia potencialmente elevada. Debido a isto, e ó feito de que a compoñente do fluxo vertical non inflúe de maneira significativa, os puntos de monitorización concentraranse na parte superior do acuífero.

CONTAMINANTES PRACTICAMENTE INMISCIBLES NA AUGA

Neste apartado abórdase o caso daqueles contaminantes que, independentemente da súa densidade, presen-

tan unha solubilidade moi baixa e que, polo tanto, acadan o límite de saturación con pequenas cantidades de vertido contaminante. Trátase dunha situación na que o corpo principal do fluído permanecerá sobre o nivel freático. Por outra parte, as fraccións máis solubles do fluído dispersaranse cara ó acuífero, chegando á auga subterránea e movéndose na mesma dirección de fluxo ca esta.

D. CONTAMINANTES LÍQUIDOS EN FASE NON ACUOSA

Os líquidos en fase non acuosa (*Non-aqueous phase liquids*, NAPL) son substancias orgánicas caracterizadas pola súa baixa solubilidade na auga (inmiscibilidade). Trátase de fases contaminantes presentes no subsolo e que se clasifican en función da súa densidade:

LÍQUIDOS LIXEIROS EN FASE NON ACUOSA (*LIGHT NON-AQUEOUS PHASE LIQUIDS*, LNAPL)

Son os derivados do petróleo con densidade menor cá da auga. Aparecen no subsolo como consecuencia de vertidos de mesturas que poden conter diferentes proporcións de varias clases de compoñentes, nas que se inclúen compostos tales como fraccións aromáticas volátiles (benceno, tolueno, etilbenceno e xileno, BTEX), alcanos de cadea curta e cadea longa, así como outros aditivos como o metil-terbutil éter (MTBE). Como exemplos destas mesturas cabe citar a gasolina, o diesel, o queroseno e os distintos tipos

de fueles. Todos eles son adsorbidos polos solos e permanecen separados en tres fases: libre, vapor e disolta (en moi pequena proporción). Mediante un mecanismo de infiltración acadan a zona saturada e dispóñense en forma de capa flotante sobre o nivel freático.

LÍQUIDOS DENSOS EN FASE NON ACUOSA (*DENSE NON-AQUEOUS PHASE LIQUIDS*, DNAPL)

Constituídos por compostos que teñen unha densidade maior cá da auga e corresponden a compostos máis pesados. Inclúense nestes os disolventes clorados, tales como o cloruro de metileno, cloroformo, tricloroetileno (TCE), freóns, etc. Ó igual cós LNAPL, permanecen no solo separados en tres fases, sen embargo, ó chegar á zona saturada, debido á súa elevada densidade, migran ata o fondo do acuífero, incluso ata o límite coa zona impermeable inferior. No acuífero non se moven no sentido do fluxo da auga subterránea, senón que, como xa se apuntou con anterioridade, o seu movemento verase influído pola unidade topográfica inmediatamente inferior ó acuífero.

E. TECNOLOXÍAS DE REMEDIACIÓN

Ata a data, o maior desenvolvemento das tecnoloxías de descontaminación prodúcese no tratamento de combustibles derivados do petróleo que difunden a través do solo e do acuífero (gasolina, diesel e combustibles de motor a reacción, *jet fuel*) e, en

menor medida, de disolventes clorados. En función da estratexia adoptada para o tratamento da contaminación, as tecnoloxías de remediación—non térmicas (estas, pola súa amplitude, merecen un tratamento diferenciado)— para a descontaminación de solos e acuíferos contaminados poden dividirse nas seguintes categorías:

1. Tecnoloxías de solidificación e estabilización.
2. Procesos de reacción.
3. Técnicas de separación, mobilización e extracción.

Trátase de tecnoloxías de tratamento *in situ* e *ex situ* de empraamentos contaminados, dirixidas á diminución tanto da mobilidade como da toxicidade dos contaminantes mediante a redución da solubilidade, volatilidade e permeabilidade media destes. Dentro das súas aplicacións *in situ* encóntrase o tratamento de solos pouco profundos. No que se refire ó tratamento *ex situ*, aplícase en solos con contaminación complexa. Neste último caso, a reutilización do solo dependerá dos niveis de contaminación residual así como do uso ó que se destine, e nalgún caso serán devoltos ó lugar de orixe e inmovilizados mediante capas protectoras para o seu posterior uso como empraamento de naves de almacenamento, industriais, etc.

As tecnoloxías de estabilización e solidificación desenvolvéronse para o tratamento de solos contaminados con

substancias pouco volátiles ou solubles. Existen distintas variedades:

1. Inertización (*Asphalt batching*): consiste na encapsulación do solo contaminado nunha matriz asfáltica. Nos casos nos que haxa compoñentes orgánicos volátiles presentes no solo, estes serán paralelamente volatilizados durante o proceso e tratados nun sistema de tratamento de gases (sistema *off-gas*).

2. Bioestabilización: tratamento microbiolóxico *ex situ* que conduce á rápida degradación dos compostos máis volátiles, así como das fraccións solubles das mesturas contaminantes presentes no solo. O resultado destes tratamentos é un residuo biodegradable que se difunde en menor medida cós compostos presentes inicialmente no solo.

3. Vitrificación: mestura do solo contaminado cos materiais necesarios para a formación dunha matriz cristalina. Trátase dun proceso que se pode levar a cabo no mesmo lugar (vitrificación *in situ*) ou ben nunha unidade de tratamento externa (vitrificación *ex situ*). Para que ocorra, nun principio sométese o solo a temperaturas extremadamente altas, co que se produce a volatilización dos compoñentes orgánicos presentes e, posteriormente, sométese a un proceso de arrefriamento tralo cal os metais non volátiles e os compostos radioactivos pasan a formar parte do bloque cristalino resultante. É unha técnica cara debido ós elevados requirimentos enerxéticos.

4. Axentes puzolánicos: a adición destes axentes, por exemplo o cemento, fomentan a formación de enlaces químicos entre as partículas do solo e poden formar enlaces con contaminantes inorgánicos, de tal modo que diminúe a permeabilidade do solo impedindo o acceso dos contaminantes á matriz sólida.

5. Adición de cal vivo: é un método utilizado para a estabilización; consiste en provocar unha diminución da permeabilidade dos solos mediante o recheo dos espazos de poro intersticiais e a formación de enlaces débiles entre as partículas do solo. Pódense engadir simultaneamente cantidades variables de auga e cemento como endurecedor e á vez catalizador das reaccións puzolánicas e de hidratación.

Mención especial merecen os métodos de contención ou barreiras, deseñados para prever o movemento dos contaminantes fóra da zona contaminada mediante a creación de barreiras físicas ou hidráulicas. Esta tecnoloxía aplícase a solos de baixa permeabilidade, tanto arxilosos como estratificados. A súa aplicabilidade esténdese a solos artificiais compostos por capas xeotéxtiles. Existen sistemas innovadores que consisten na combinación de procesos reactivos con métodos físicos de contención. Estes sistemas denomínanse barreiras reactivas e son tratamentos *in situ* que consisten na combinación da instalación de barreiras de contención (unidades permanentes ou semipermanentes) e a

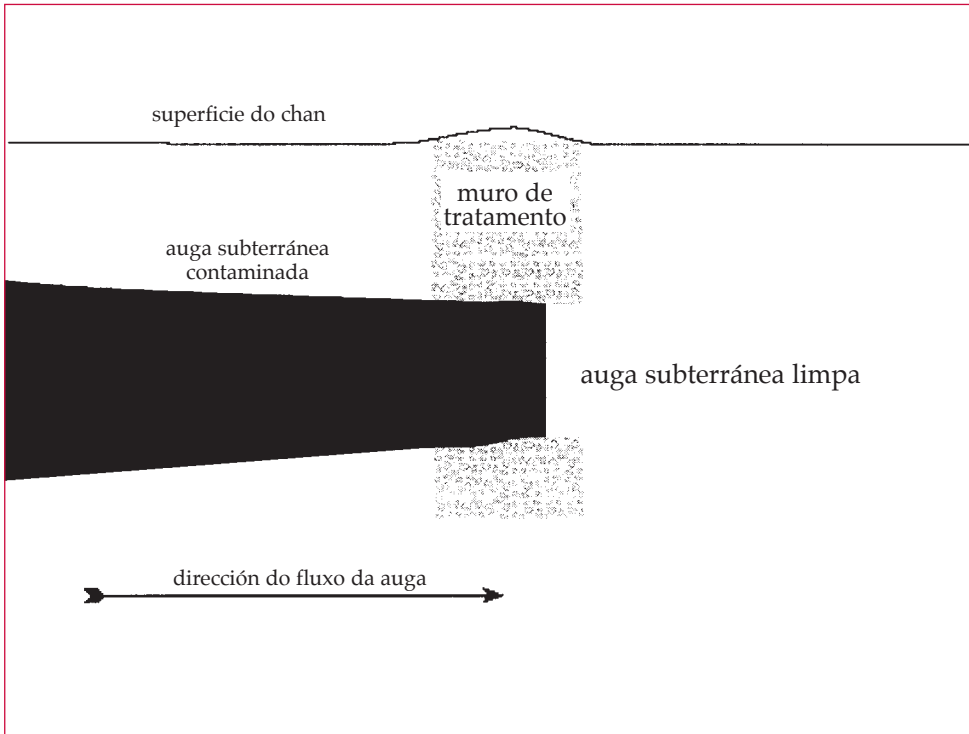


Figura 2. Esquema básico do funcionamento das barreiras reactivas para a remediación de solos e acuíferos contaminados.

canalización do fluxo de pluma contaminante cara á dita barreira. Son barreiras permeables (contéñen pequenos espazos que permiten o fluxo de auga subterránea ó seu través), e a recuperación dos contaminantes nelas ten lugar mediante procesos físicos, ou ben químicos e biolóxicos como a precipitación, adsorción, fixación, oxidación/reducción e degradación.

Co fin de evitar que a pluma contaminante migre ó outro lado da barreira, pódense engadir axentes como os catalizadores metálicos,

nutrientes ou osíxeno. As reaccións que teñen lugar nestes sistemas dependerán de parámetros como o pH, potencial redox, concentracións e velocidades de reacción. Por iso, unha aplicación con éxito require unha caracterización dos contaminantes presentes, do réxime de fluxo de auga subterránea e da xeoloxía do subsolo.

Nas *tecnoloxías de reacción* inclúense os procesos de reacción, tanto químicos como biolóxicos, e trátase de procesos utilizados para a destrución ou transformación da estrutura

química dos contaminantes, converténdoos en substancias inocuas ou, alomenos, menos perigosas cós produtos iniciais. Estas tecnoloxías poden ser utilizadas na descontaminación *in situ* ou *ex situ*. A aplicación *in situ* non require a escavación ou extracción do material xeolóxico ou da auga contaminada, mentres que para a aplicación *ex situ*, a auga, o solo, ou ambos, son extraídos e descontaminados en superficie, xa sexa no propio emprazamento (*on site*) ou fóra del (*off site*).

Nos procesos con reacción biolóxica, coñecidos xeralmente como biorremediación, utilízanse microorganismos para provocar as reaccións de transformación dos contaminantes, que atopan nos nutrientes presentes no solo a fonte de carbón e enerxía necesaria para o seu crecemento (tamén se poden engadir nutrientes para favorecer o proceso). As técnicas de biorremediación son amplamente aplicables para o control e remediación de hidrocarburos procedentes do petróleo. Non obstante, a capacidade de biodegradación dos distintos derivados varía, e é menor no caso dos hidrocarburos máis pesados. As velocidades de biodegradación naturais dos hidrocarburos poden verse intensificadas cando se lle subministra á zona contaminada a substancia que limita o crecemento microbiano, feito que constitúe a base dos procesos de biorremediación.

En canto ós procesos de reacción química, estes usáronse con menor

frecuencia cós biolóxicos. Dentro destas tecnoloxías de destrución ou transformación poderíanse incluír tamén os métodos de tratamento térmico, xa que consisten na aplicación de calor sobre o terreo para provocar a alteración da estrutura química dos produtos contaminantes presentes no medio. Sen embargo, e polas súas características específicas, merecen un tratamento á parte que se deixará fóra deste traballo.

As técnicas de separación, mobilización e extracción baséanse en procesos deseñados para a separación dos contaminantes dos materiais xeolóxicos no solo (zona non saturada) e no acuífero (solo saturado con auga, situado baixo o nivel freático). A continuación enuméranse algunhas destas tecnoloxías de separación, mobilización e extracción que se explican de xeito detallado máis adiante.

1. Extracción de vapores do solo (*Soil vapor extraction*).
2. Aspersión de aire (*Air sparging*).
3. Lavado de solo (*Soil flushing*).
4. Extracción en fase múltiple (MPE, *Multi-phase extraction*).

Estas técnicas de separación, mobilización e extracción poden combinarse entre si co fin de incrementar os obxectivos de descontaminación. Así, por exemplo, ó combinar a tecnoloxía de aspersión de aire cos sistemas de extracción de vapores do solo (SVE), aplicados no tratamento de

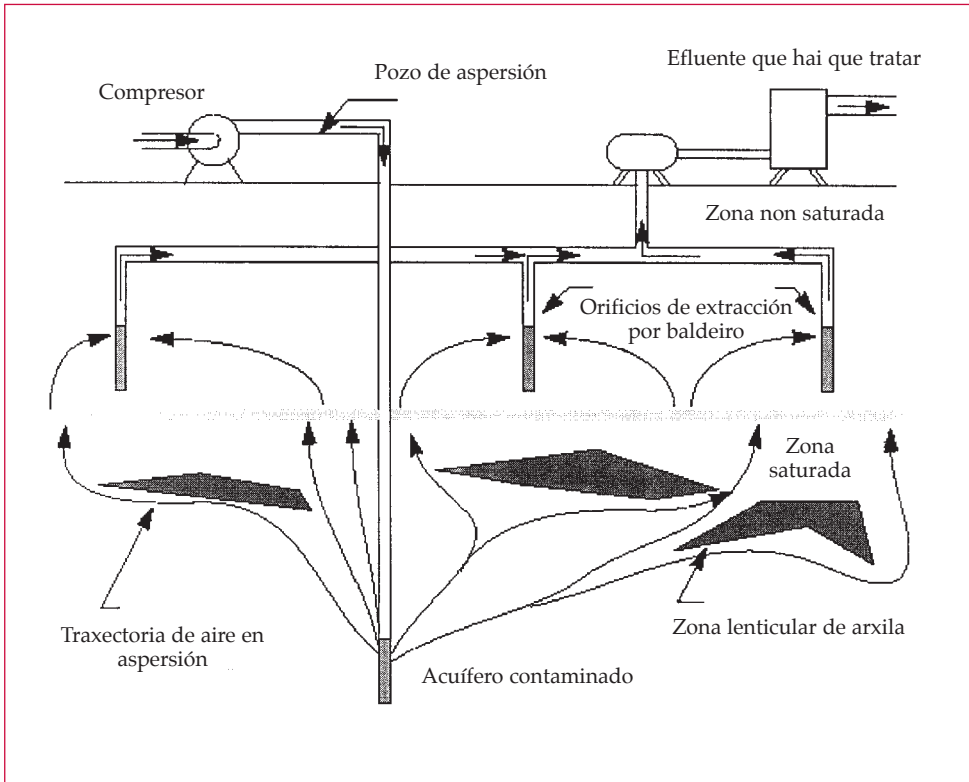


Figura 3. Esquema dun sistema de construción dos pozos de extracción utilizados na descontaminación coa tecnoloxía de extracción de dobre fase.

solos exclusivamente, pódese proceder á remediación simultánea das zonas non saturada e saturada do subsolo.

1. EXTRACCIÓN DE VAPORES DO SOLO

A extracción de vapores do solo (*Soil vapor extraction, SVE*) é unha tecnoloxía de remediación *in situ* que reduce as concentracións dos constituintes volátiles dos produtos petrolí-

feros adsorbidos nos solos da zona non saturada. Para iso, aplícase un baldeiro na matriz do solo que crea un gradiente de presión negativo que provoca a volatilización dos contaminantes presentes (en fase líquida) e o conseqüente movemento dos vapores obtidos cara ós pozos de extracción. Os vapores extraídos, contaminados cos compoñentes presentes na matriz do solo, son tratados posteriormente e descargados na atmosfera. Estes vapores conteñen,

ademais dos contaminantes condensados, trazas de auga subterránea e partículas do solo. Por esta razón, e co fin de minimizar os danos que poden causar nos equipos de bombeo e aumentar a efectividade do sistema de tratamento, os vapores extraídos faranse pasar por un sistema de separación de condensados e un filtro de partículas. Demostrouse que esta tecnoloxía é efectiva na redución da concentración de compoñentes orgánicos volátiles (VOC) e en certos compoñentes orgánicos semivolátiles (SVOC), os cales se atopan presentes en produtos petrolíferos en tanques de almacenamento. O maior grao de efectividade desta tecnoloxía acádase cando se emprega cos produtos petrolíferos máis lixeiros, como a gasolina. O éxito da aplicación da extracción de vapores do solo será nulo no caso de que no solo estean presentes contaminantes non volátiles, como aceites lubricantes.

Como vantaxes xerais desta tecnoloxía pódense destacar as seguintes: fácil instalación, curtos períodos de tratamento (de 6 meses a 2 anos), custo razoable e a posibilidade de combinación con outras tecnoloxías de remediación de augas subterráneas.

2. ASPERSIÓN DE AIRE

A aspersión de aire (*Air Sparging*) é unha tecnoloxía de descontaminación que permite eliminar substancias contaminantes (compostos orgánicos volátiles e algúns semivolátiles) do solo e auga subterránea situados por debaixo do nivel freático. A aspersión

de aire consiste na introducción de aire a presión na zona saturada, de forma que a medida que ascende cara ó nivel freático dá lugar a un proceso de desorción e arrastre (*stripping*) dos compostos máis volátiles disoltos na auga, ó mesmo tempo que contribúe á volatilización dos contaminantes adsorbidos no solo da zona saturada e na franxa capilar. Por outra banda, este proceso ten a vantaxe de aumentar a concentración de osíxeno no subsolo e así contribuír a acelerar a biorremediación, é dicir, a transformación dalgúns contaminantes en substancias inocuas por parte da flora natural do solo e da auga subterránea. Se os contaminantes non son susceptibles de sufrir biodegradación en condicións aerobias, os vapores xerados durante a aspersión de aire poden ser recollidos na zona non saturada do solo coa axuda dun sistema de baldeiro.

3. LAVADO DO SOLO (*WASHING* OU *FLUSHING*)

Debido a que unha cantidade significativa de hidrocarburos pode quedar retida na matriz sólida como residuo (fase non acuosa, NAPL), pódense utilizar tensioactivos ou disolventes para a súa recuperación. Estes axentes separadores permiten diminuír a tensión interfacial de NAPL e desorber os hidrocarburos do solo. Así, fórzase o paso destes a través da matriz do solo (mediante inxección —*flushing*—) e a súa extracción. A posterior coalescencia das partículas de contaminante arrastradas permite a súa separación

do aditivo nas unidades situadas na superficie do terreo tratado.

A tecnoloxía consistente na escavación, tratamento e posterior procesado do solo acostúmase a denominar *Washing*. Nalgunhas técnicas de lavado, o solo é procesado en función do tamaño das partículas que contén para concentrar os hidrocarburos nas fraccións máis finas, co fin de minimizar a cantidade de disolvente requirida.

Outros sistemas de lavado do solo consisten na adición do disolvente (auga ou outros) directamente sobre o solo seguida de axitación e, posteriormente, procédese a unha separación de auga, solo e fase NAPL. Aínda que pode ser utilizada comercialmente para o tratamento de solos contaminados con derivados do petróleo, non se trata dunha técnica comunmente usada para a recuperación dos produtos máis lixeiros e volátiles, como son a gasolina e os combustibles de motor a reacción, xa que, para a recuperación deste tipo de produtos, a volatilización é máis efectiva economicamente.

En canto ó tipo de solo, a pesar de que o lavado se utiliza para o tratamento dun amplo rango, ten unha limitada aplicabilidade no caso de solos con altos contidos en arxila, provocada polos problemas que presenta a separación das partículas arxilosas máis finas. Un aspecto que debe terse

en conta á hora de pór en marcha un proxecto de descontaminación con esta tecnoloxía é a elección dos aditivos que se utilizarán durante o proceso co fin de incrementar a mobilidade e solubilidade dos contaminantes presentes. Esta solución pode consistir nunha ou varias das citadas a continuación: auga, ácidos ou bases, oxidantes, disolventes e tensioactivos e cosolventes.

4. A EXTRACCIÓN DE FASE MÚLTIPLE (*MULTI-PHASE EXTRACTION, MPE*).

Consiste na recuperación simultánea de vapores do solo e a auga subterránea a través dun único pozo mediante a aplicación dun elevado baldeiro. Trátase dunha tecnoloxía que combina a eliminación de auga coa extracción de vapores, e aplícase ás formacións de menor permeabilidade co fin de minimizar a cantidade de auga que é necesario recuperar ou tratar. A novidade da extracción de fase múltiple fronte á extracción de vapores do solo é que extrae, de forma simultánea, os vapores do solo situado sobre o nivel freático e a auga subterránea contida no acuífero, ben mediante a aplicación dun baldeiro elevado, ben mediante a instalación dunha bomba mergullada no pozo. Desta forma, aumenta o volume da zona non saturada que se trata e amplíase a zona de influencia da extracción de vapores do solo⁴.

⁴ Neste traballo resúmese o contido de dous amplos proxectos desenvolvidos polas miñas discípulas Marta Iglesias e Sílvia Fernández. Os proxectos mencionados recibiron, na súa avaliación, a cualificación máxima.

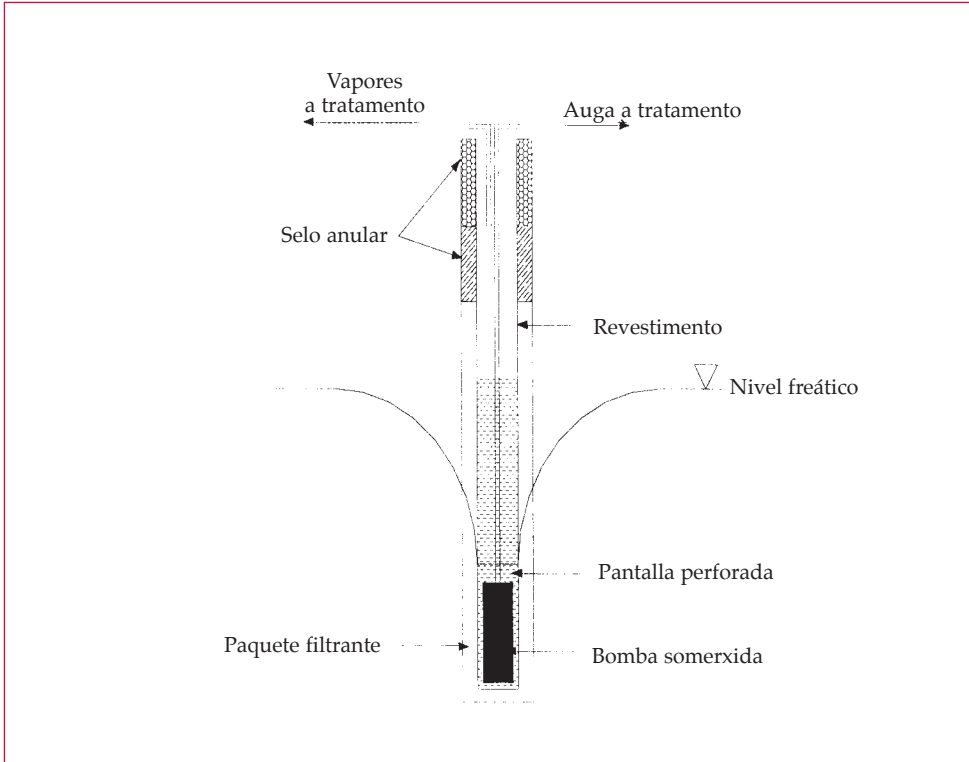


Figura 4. Esquema detallado da construción dos pozos de extracción utilizados na descontaminación coa tecnoloxía de extracción de dobre fase.

CONCLUSIÓNS

A urbanización e as actividades industriais presentan un alto potencial de contaminación do solo e da auga subterránea e isto supón unha seria ameaza para o medio e a saúde humana. Así mesmo, os custos da súa descontaminación poden resultar moi elevados, polo que existe unha importante necesidade de avaliación da natureza e extensión da contaminación e as súas implicacións.

Dentro das tecnoloxías de descontaminación diferéncianse os métodos que tratan o terreo situado sobre o nivel freático (*Soil cleanup technologies*) e aqueles que tratan os contaminantes baixo o nivel freático (*Ground water cleanup technologies*). No que se refire ós contaminantes, estes pódense atopar solubilizados en auga, adsorbidos no solo ou formando bolsas (o que se coñece como fase libre).

As tecnoloxías de remediación non térmicas para a descontaminación

de solos e acuíferos contaminados pódense dividir nas seguintes categorías: Tecnoloxías de solidificación e estabilización, procesos de reacción e técnicas de separación, mobilización e extracción.

No VI Programa de Acción da Comunidade Europea en materia do Medio insístese na importancia de reducir o deterioro do medio causado polo mal uso, o esgotamento e a contaminación dos recursos naturais como o solo, a auga ou o aire. Neste marco é necesario seguir potenciando o desenvolvemento de tecnoloxías máis económicas e eficaces.

BIBLIOGRAFÍA

- Allmon, W. E., *et al.*, *Groundwater Circulating Well Technology Assessment*, Washington DC, Naval Research Laboratory, 1999.
- Boulding, J. R., *Practical Handbook of Soil, Vadose Zone and Groundwater Contamination*, New York, Lewis Publishers, 1995.
- Brown, R. A., R. J. Hicks e P. M. Hicks, *Use of Air Sparging for In Situ Bioremediation*, Ann Arbor, Michigan, Lewis Publishers, 1994.
- Cohen, R. M., *et al.*, *Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems. Ground Water Issue*, Washington DC, Office of Research and Development & Office of Solid Waste and Emergency Response, United States Environmental Protection Agency, 1997.
- Do, D. D., *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*, Londres, Imperial College Press, 1998.
- Hein, G., *et al.*, *Field-Scale Model for Air Sparging Performance Assessment and Design*, Houghton, Michigan Technological University, 1996.
- Leeson, A., *et al.*, *Air Sparging Design Paradigm. Draft*, Columbus (Ohio), Batelle, 1999.
- López Vera, F., *Contaminación de las aguas subterráneas*, Madrid, MOPU, Centro de Publicaciones, 1990.
- Miller, R. R., e D. S. Roote, *Technology Overview Report. Air Sparging*, Pittsburgh, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 1996.
- *Technology Overview Report. Inwell Vapor Stripping*, Pittsburgh, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 1997.
- National Research Council, *State of the practice of Ground Water and Soil Remediation, Innovations in Ground Water and Soil Cleanup*, Washington DC, National Academy Press, 1997.
- Nielsen, D. M., *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*, Lewis Publishers, 1991.

- Puy, J., *Procedimientos de sondeo*, Madrid, Servicio de Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear, 1981.
- Suthersan, S. S., *In situ air sparging. In situ treatment technology*, Boca Raton (Florida), Lewis Publishers, 1996.
- Thibodeaux, L. J., *Chemodynamics*, New York, John Wiley and Sons, 1979.
- US EPA, *Ground Water and Wellhead Protection*, Office of Research and Development, Washington DC, United States Environmental Protection Agency, 1994.
- _____, *Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells*, 1991.
- _____, *Innovative Technology Evaluation Report. Subsurface Volatilization and Ventilation System (SVVS)*, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, United States Environmental Protection Agency, 1995.
- Wessenlingh, J. A., e R. Krishna, *Mass Transfer in Multicomponent Mixtures*, Delft, Delft University Press, 2000.



Isabel VIDAL TATO, "Descontaminación de solos", *Revista Galega do Ensino*, núm. 38, febreiro, 2003, pp. 139-155.

Resumo: Este sucinto informe tecnolóxico é unha revisión xeral da información recollida sobre a tecnoloxía de descontaminación de solos e acuíferos. Inclúese unha introducción sobre os principios e técnicas xerais, información sobre parámetros e contaminantes dos terreos e un repaso do emprego xeral das mencionadas tecnoloxías. A bibliografía citada contén información adicional.

Palabras chave: Solo. Acuífero. Descontaminación. Aspersión. Extracción. NAPL. DNAPL. VOC.

Resumen: Este sucinto informe tecnolóxico es una revisión general de la información recogida sobre la tecnología de descontaminación de suelos y acuíferos. Se incluye una introducción sobre los principios y técnicas generales, información sobre parámetros y contaminantes de los terrenos y un repaso del empleo general de las mencionadas tecnologías. La bibliografía citada contiene información adicional.

Palabras clave: Suelo. Acuífero. Descontaminación. Aspersión. Extracción. NAPL. DNAPL. VOC.

Summary: This technology summary report is an overview of information collected on soil and groundwater remediation technology. An introduction to the general principles and techniques, information about site-related parameters and contaminants, and an overview about the general applicability of the cited technologies are included. Cited literature contains additional information.

Key-words: Soil. Groundwater. Remediation. Sparging. Extraction. NAPL. DNAPL. VOC.

— Data de recepción da versión definitiva deste artigo: 31-10-2002.

